

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Optimización luminotécnica y eficiencia energética del alumbrado público con
luminarias LED en vías públicas.

ING-2839

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

Presentado por:

Francisco Josué Larrea Saltos

Bryan Alexander Holguin Suconota

Guayaquil – Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este logro a mi amada Madrecita Mercedes (Q.E.P.D), mi guía eterna. Agradezco profundamente a mi madre Victoria Suconota y a mi tío Alfredo Suconota por su apoyo incondicional, así como a Gabriela Saénz por su compañía en este proceso. Finalmente, a mis compañeros Chelsea, a Angie, Juan, Ángelo, Isaí, Cristhian y Joel, por su amistad. Gracias a todos por ser mi pilar. (Bryan Holguin)

Dedico este logro a mis padres Francisco Larrea y Gina Saltos por ser los pilares fundamentales de cada meta conseguida, cada decisión tomada y por representar un apoyo fundamental en todas las situaciones difíciles que se me han presentado. (Francisco Larrea)

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Doctor Miguel Torres por aconsejarme en un momento complicado en mi vida, gracias a sus pautas conseguí llegar hasta este nivel de mi carrera con muchos éxitos en el camino. Así mismo agradezco el seguimiento y apoyo de los ingenieros Douglas Aguirre y Jorge Aguilar en todo el proceso de nuestro proyecto integrador. (*Francisco Larrea*)

Agradezco a mi familia por su apoyo y motivación, fundamentales en mi formación profesional. De igual manera, expreso mi gratitud a los ingenieros Iván Endara y Jorge Valverde por la oportunidad de crecimiento, y a los ingenieros Douglas Aguirre y Jorge Aguilar por su valioso acompañamiento en el desarrollo del proyecto integrador. (*Bryan Holguin*)

Declaración Expresa

Nosotros Larrea Saltos Francisco Josue & Holguin Suconota Bryan Alexander, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL, no recibe en este acto una licencia gratuita en plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier información, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra investigación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 31 de mayo del 2025.

Larrea Saltos

Francisco Josue

Holguin Suconota

Bryan Alexander

Evaluadores

Mgtr. Pasmay Bohórquez

Patricia Isabel

Profesor de Materia

MSc. Douglas Mauricio

Aguirre Hernández

Tutor de proyecto

Resumen

El alumbrado público en vías urbanas constituye un elemento esencial para la seguridad, eficiencia energética y calidad de vida de los ciudadanos. En la ciudad de Guayaquil, gran parte de la infraestructura aún utiliza lámparas de sodio de alta presión (HPS), las cuales presentan limitaciones en consumo energético, costos de mantenimiento y reproducción cromática. En contraste, la tecnología LED ofrece una alternativa más eficiente, duradera y sostenible.

Este proyecto se centra en la optimización técnico-económica del alumbrado público mediante el reemplazo de luminarias HPS por sistemas LED. Para ello, se seleccionó una calle piloto donde se realizaron mediciones reales de niveles de iluminancia, consumo energético y estado actual de las luminarias. Estos datos fueron comparados con simulaciones luminotécnicas para validar el desempeño y verificar el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis económico para evaluar el ahorro energético, los costos operativos y la recuperación de la inversión, utilizando indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback. Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en la eficiencia energética, la calidad de la iluminación y la sostenibilidad a largo plazo, demostrando la viabilidad de implementar la tecnología LED en el sistema de alumbrado público de Guayaquil como un modelo escalable para toda la ciudad.

Palabras clave: Alumbrado público; Tecnología LED; Eficiencia energética; Simulación luminotécnica; Análisis económico; Guayaquil.

Abstract

Public lighting in urban roads is a key component for safety, energy efficiency, and the quality of life of citizens. In the city of Guayaquil, the majority of the existing infrastructure is still based on high-pressure sodium (HPS) lamps, which present considerable limitations in terms of energy consumption, maintenance costs, and color rendering. In contrast, light-emitting diode (LED) technology offers a more efficient, durable, and sustainable alternative.

This project focuses on the technical and economic optimization of public lighting through the replacement of HPS luminaires with LED systems. A pilot street was selected to carry out real measurements of illuminance levels, energy consumption, and the current condition of luminaires. These data were compared with lighting simulations to validate performance and compliance with national and international standards.

Additionally, an economic analysis was conducted to evaluate energy savings, operational costs, and investment recovery, using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback. The results highlight significant improvements in energy efficiency, lighting quality, and long-term sustainability, demonstrating the feasibility of implementing LED technology in Guayaquil's public lighting system as a scalable model for the entire city.

Keywords: *Public Lighting; LED Technology; Energy Efficiency; Lighting Simulation; Economic Analysis; Guayaquil.*

Índice General

Resumen	6
<i>Abstract</i>	7
Simbología	10
Índice de figuras	12
Índice de tablas	13
Índice de ecuaciones	14
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	3
1.3 Justificación del Problema	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5 Marco teórico	6
Capítulo 2	15
2. Metodología	16
Capítulo 3	40
3.1 Análisis Lumínico	41
3.2 Análisis Energético y Económico	43
3.2.1 <i>Consumo anual</i>	43
3.2.2 <i>Ahorro energético</i>	52
3.2.3 <i>Ahorro Económico</i>	53
3.3 Análisis de resultados	55
Capítulo 4	57
4.1. Conclusiones y recomendaciones	58
4.1.1 Conclusiones	58
4.1.2 Recomendaciones	59
Bibliografía	60
Apéndice	61

Abreviaturas

ARCERNNR Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables

HPS High Pressure Sodium (Sodio de Alta Presión)

IEC International Electrotechnical Commission

IESNA Illuminating Engineering Society of North America

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización

IRC Índice de Reproducción Cromática

LED Light Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz)

VAN Valor Actual Neto

TIR Tasa Interna de Retorno

Simbología

D Distancia longitudinal entre puntos de medición [m]

d Distancia transversal entre puntos de medición [m]

E Iluminancia [lx]

E_m Iluminancia media [lx]

E_{min} Iluminancia mínima [lx]

E_{max} Iluminancia máxima [lx]

I Corriente eléctrica [A]

K Temperatura de color [K]

L Longitud de línea [m]

L_m Luminancia media [cd/m²]

P Potencia [W]

R Resistencia eléctrica [Ω]

ρ Resistividad del conductor [$\Omega \cdot m$]

S Distancia entre postes [m]

U_0 Uniformidad general

U_1 Uniformidad longitudinal

V Voltaje [V]

η

Eficacia luminosa [lm/W]

Índice de figuras

Figura 2.1. Pasos para realizar el cambio a luminaria led	16
Figura 2.2. Ruta seleccionada	18
Figura 2.3. Esquema de medición de luminancia	19
Figura 2.4. Parámetros de las luminarias considerados en el software DIALux	36
Figura 2.5. Simulación de valores de iluminancia según los puntos de medición.....	36
Figura 2.6. Aprobación de los datos de proyección lumínica simulada.....	37
Figura 2.7. Modelo en 3D de la vía simulada con luminarias led	37
Figura 2.8. Simulación de valores de iluminancia según los puntos de medición.....	38
Figura 2.9. Aprobación de los datos de proyección lumínica simulada.....	38
Figura 2.10. Modelo en 3D de la vía simulada con luminarias led	39
Figura 3.1. Comparativa técnica entre luminarias	54

Índice de tablas

Tabla 1.1. Características de las luminarias para alumbrado público 4.....	9
Tabla 1.2. Luminancia de calzada para tráfico motorizado.	11
Tabla 1.3. Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal.	12
Tabla 1.4. Requisitos mínimos de iluminación para zonas de conflicto.....	13
Tabla 1.5. Requisitos mínimos de iluminación para zonas de conflicto.....	13
Tabla 2.1. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias de sodio	21
Tabla 2.2. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias de sodio	23
Tabla 2.3. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias de sodio	25
Tabla 2.4. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias tipo led	27
Tabla 2.5. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias tipo led	29
Tabla 2.6. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias tipo led	31
Tabla 2.7. Parámetros eléctricos de las luminarias antes y después del cambio	39
Tabla 3.1. Parámetros lumínicoa simulados	41
Tabla 3.2. Parámetros de uniformidad de iluminancia medidos	42
Tabla 3.3. Consumo anual de energía y costo por luminaria.....	43
Tabla 3.4. Consumo anual de energía y costo por luminaria.....	44
Tabla 3.5. Comparativa energética y económica	48
Tabla 3.6. Cálculo del Payback	52

Índice de ecuaciones

Ecución (2,1) Distancia de separación entre los puntos de medición en dirección longitudinal ...	20
Ecución (2,2) Distancia de poste a poste	20
Ecución (2,3) Espacio de separación de los puntos en dirección transversal.	20
Ecución (2,4) Luminancia promedio.....	34
Ecución (3,1) Uniformidad general.....	42
Ecución (3,2) Uniformidad longitudinal.....	42
Ecución (3,3) Precio de compra de energía de la empresa eléctrica distribuidora	44
Ecución (3,4) Corriente de línea total	44
Ecución (3,5) Resistividad del conductor	45
Ecución (3,6) Longitud del conductor	45
Ecución (3,7) Resistencia del material	45
Ecución (3,8) Perdidas eléctricas en la línea	46
Ecución (3,9) Energía útil anual	46
Ecución (3,10) Energía perdida anual.....	46
Ecución (3,11) Cálculo del VAN	48
Ecución (3,12) Cálculo del TIR	49
Ecución (3,13) Cálculo del Payback	52

Capítulo 1

1.1 Introducción

El alumbrado en vías públicas representa un componente importante en el desarrollo urbano moderno, no solo por su papel en la seguridad vial y ciudadana, sino también por su impacto en la calidad de vida, la movilidad nocturna y el desarrollo económico de las ciudades. En este contexto, Guayaquil, al constatar como una de las ciudades más grandes e importantes del Ecuador, enfrenta el reto si se trata de modernizar la infraestructura de alumbrado público, ya que el sistema actual consume una gran cantidad de energía. Por ello, se busca garantizar un servicio eficiente, sostenible y acorde con las demandas tecnológicas actuales evaluando una restructuración del sistema de iluminación en las vías públicas [1] [2].

En Guayaquil, el sistema de alumbrado público en las vías públicas de la ciudad ha estado compuesto mayormente por luminarias de sodio de alta presión (HPS), tecnología que, si bien ha sido ampliamente utilizada por su eficiencia inicial, presenta problemas técnicos y limitaciones importantes en cuanto a reproducción cromática, consumo energético y vida útil. Estos factores provocan elevados costos de operación, que se deban realizar mantenimientos frecuentes, contaminación lumínica y deficiencias en la percepción visual del entorno urbano [3].

Ante esta situación, la tecnología led (diodo emisor de luz) ha emergido como una alternativa completamente eficiente y duradera en varios contextos. Su capacidad para reducir considerablemente el consumo energético, gozando de una mayor vida útil y mejor calidad de iluminación, impulsa a múltiples ciudades del Ecuador a implementar programas de renovación tecnológica en sus sistemas de alumbrado público [4].

Este proyecto tiene como objetivo principal realizar un análisis técnico-económico del reemplazo de luminarias de sodio por luminarias LED en el sistema de alumbrado público de

Guayaquil. Para ello, se ha seleccionado una calle piloto donde se han efectuado mediciones reales de consumo energético, niveles de iluminación y estado actual de las luminarias. A partir de estos datos, se busca implementar una simulación detallada que permita comparar el comportamiento técnico y económico de ambas tecnologías, con proyección a escala cantonal.

El estudio busca, además, evaluar el impacto del cambio tecnológico desde una perspectiva de sostenibilidad energética, reducción de emisiones contaminantes, mejora del entorno urbano nocturno, y optimización del gasto público. Todo esto se enmarca en una visión de ciudad inteligente en el campo del alumbrado público, ya que se prioriza la eficiencia energética y el uso racional de los recursos.

1.2 Descripción del Problema

La seguridad, eficiencia energética, presupuesto y relación entre empresa distribuidora-cliente son los parámetros base que la empresa eléctrica distribuidora de energía busca mejorar y optimizar con respecto al servicio de alumbrado público. Como proyecto, es necesario realizar una comparativa en relación con la viabilidad de cambiar el alumbrado de lámparas halógenas por leds, ya que la empresa requiere analizar si este cambio resulta conveniente en los aspectos mencionados. La empresa eléctrica distribuidora de energía no posee una plantilla estándar con las que se pueda a recopilar la información y los pasos necesarios para llevar a cabo proyectos similares, por lo que se necesita estructurar los datos en una ficha técnica donde se puedan validar las variables inmersas antes, durante y después del cambio de luminaria.

Dentro de los parámetros variables que son considerados durante todo el proyecto, existen limitantes que impiden al cliente agilizar el proceso de cambios de luminaria en caso de emergencia o por requerimientos específicos, por lo que estos protocolos de atención presentan

tiempos prolongados de ejecución. Sin conocer la viabilidad del cambio ni poseer una plantilla estructurada para elaborar el trabajo correctivo, la empresa pierde la relación de satisfacción con el usuario final.

Al no conocer las ventajas y desventajas específicas, la empresa eléctrica distribuidora de energía no se permite extrapolar o estandarizar los procedimientos de reemplazo por luminarias leds a todos los circuitos de alumbrado público en la ciudad de Guayaquil, ya que tampoco se cuenta con un modelado técnico ni simulado que represente detalladamente el comportamiento eléctrico y económico al llevarlo a cabo, por lo que se requiere evaluar los costos del reemplazo y los parámetros eléctricos relevantes durante todo el proceso para cada tipo de luminaria.

Para conseguir toda la información antes mencionada, se requiere hacer tomas de muestra en sitio de circuitos de iluminación en la ciudad de Guayaquil, cosa que resulta complicada para el personal técnico de la empresa por la cantidad de trabajos pendientes a realizar. Sin poder tomar mediciones, no es posible generar un modelado del circuito de alumbrado público basado en iluminación led, ya que se necesitan medir parámetros técnicos y luminosos tales como la eficacia, temperatura, IRC, iluminancia, uniformidad de brillo, factor de potencia y resistencia a variaciones de voltaje en las luminarias. Estas variables son algunas de las limitantes que impiden agilizar el proceso de seleccionar, cambiar y evaluar la eficacia de la sustitución.

1.3 Justificación del Problema

El ahorro energético es un tema que es abordado en los tiempos modernos, ya que se requiere de un sistema eficiente y optimizado, así como lo más barato posible. Bajo este contexto cualquier empresa eléctrica distribuidora de energía (sistema de alumbrado en vías públicas) procura cumplir con los estándares mencionados cumpliendo con las normativas vigentes. Para estas estructuras de

alumbrado público, es esencial ser lo más baratos, optimizados y duraderos, ya que es un servicio y el derecho de los ciudadanos de cualquier sector, tanto la empresa como el usuario final coinciden en mantener y gozar de un servicio de calidad respectivamente.

Empleando estas lámparas de alumbrado LED, posterior a un estudio lumínico, se busca efectivamente cumplir con las características mencionadas, donde se entregue un servicio lumínico apto y la empresa gaste lo menor posible. Con este modelo de alumbrado donde se toman unas cuantas muestras en campo del circuito de iluminación actual, se reemplaza por la tecnología pensada identificando el rango de mejora en todos los parámetros. De esta manera se extrae este modelo a una perspectiva macro en toda la ciudad de Guayaquil, satisfaciendo al usuario final donde la distribuidora ahorra dinero y ofrece un sistema de alumbrado en vías públicas con un ahorro energético considerable y un cliente satisfecho.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Optimizar el sistema de alumbrado público en las vías públicas de Guayaquil bajo la normativa ARCERNR-007/23, mediante un diseño luminotécnico eficiente que implemente luminarias led, de tal manera que se mejoren los niveles de iluminancia, se reduzca el consumo energético junto a los costos operativos y se garantice la relación servicio-empresa con el usuario final.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico y levantamiento detallado del sistema de alumbrado público actual en una vía pública, evaluando sus deficiencias en distribución lumínica, niveles de

iluminancia, consumo energético y cumplimiento normativo, para contrastar con el alumbrado público basado en luces leds.

- Diseñar un modelo de alumbrado público con luminarias led que optimice la distribución de luz, incluyendo un análisis técnico-económico exhaustivo que respalte la viabilidad del proyecto, con el fin de que se proyecte una reducción significativa del consumo energético y los costos operativos asociados.
- Elaborar una plantilla técnica, recopilando información en campo durante todo el proceso del cambio de luminaria, para estandarizar y agilizar este tipo de trabajos correctivos por parte de la empresa en cualquier circuito de alumbrado público en la ciudad de Guayaquil.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Alumbrado Público.

Existen varios conceptos para alumbrado público, según las consideraciones de espacio y el nivel de tránsito del mismo, las categorías dependen de muchas especificaciones y características físicas y eléctricas de cada circuito. Se presentan ciertas definiciones que servirán para mejorar la comprensión del desarrollo del proyecto:

Alumbrado público: Es el sistema de iluminación usado en espacios y vías públicas de una determinada ciudad, cuyo objetivo es el de facilitar la movilidad, garantizar la seguridad ciudadana, adornar el entorno urbano y ser una suma positiva para el desarrollo de actividades en las noches o en zonas oscuras. Este tipo de alumbrado se divide en tres categorías principales las cuales son alumbrado público general, ornamental e intervenido [2].

Alumbrado público general: Representa a los niveles de iluminación instalados en vías con tránsito netamente peatonal y vehicular. Considera a su vez el uso de escenarios deportivos de libre acceso y uso público, ya sean cubiertos o descubiertos, de tal manera que se ubiquen en zonas urbanas o rurales y pertenezcan al dominio público o comunitario. No se consideran dentro de esta categoría las luminarias instaladas en áreas que se encuentren bajo régimen de propiedad horizontal, así como aquellas correspondientes al alumbrado ornamental e intervenido ya que para estas se encuentra un grupo específico [2].

Alumbrado público intervenido: Este grupo responde a la iluminación de vías públicas que, por decisiones específicas de los gobiernos autónomos descentralizados o por leyes estipuladas particulares, brinda niveles de iluminación que no son regidos por la normativa vigente ni requiere una infraestructura no contemplada dentro de los estándares del alumbrado público general [2].

Alumbrado público ornamental: Usado en la iluminación de espacios como parques, plazas, iglesias, monumentos y otros sitios con valor histórico, cultural o recreativo resultando un sistema importe para el turismo. Este tipo de iluminación responde a consideraciones definidas por la autoridad municipal correspondiente o por el estado, el cual no busca responder necesariamente a los niveles técnicos de iluminación regulados para vías públicas según los estándares considerados o las normativas vigentes [2].

Un sistema de alumbrado público debe cumplir con parámetros técnicos-eléctricos y con niveles adecuados iluminancia, uniformidad de la luz, índice de deslumbramiento, y reproducción cromática, de forma que garantice eficiencia, seguridad y calidad en el servicio de iluminación independientemente el tipo de vía.

Tecnologías de Iluminación: Las tecnologías en el sistema del alumbrado público se han utilizado según el presupuesto y necesidades de las entidades gubernamentales en los espacios, vías o sectores, estos sistemas usados comúnmente pueden ser las lámparas de sodio de alta presión (HPS), halogenuros metálicos, y lámparas fluorescentes. Sin embargo, actualmente se han implementado la migración hacia tecnologías más eficientes como el led, esto se debe a su alta eficiencia, menor consumo y vida útil favorable.

Lámparas de Sodio de Alta Presión (HPS): Son las más usadas en el alumbrado público actualmente en el Ecuador. Usan una especie de descarga eléctrica en un gas de sodio para producir luz. Sus ventajas incluyen una alta eficacia luminosa (hasta 100 lm/W), llegando a durar entre 15,000 y 18,000 horas lo que representa un estimado de 3 a 5 años de operatividad. Además gozan de un bajo costo inicial de instalación y compra de las lámparas [3].

Sin embargo, presentan importantes desventajas:

- Baja reproducción cromática (color amarillento lo que puede perturbar la visión).
- Contaminación lumínica (Efectos cebra y deslumbramientos).
- Encendido lento y sensibilidad al ciclo de encendido/apagado con tiempos de respuesta lentos.

Luminarias LED: Los diodos emisores de luz son la tecnología que presenta la mayor cantidad de proyectos de implementación en el campo de la iluminación debido a su alta eficiencia energética, mayor vida útil (hasta 100,000 horas) lo que representa una vida útil de hasta 10 años, encendido instantáneo, resistencia a golpes y vibraciones, y buena distribución junto a una correcta reproducción cromática. Con este sistema led se permite un direccionamiento más preciso de la luz, donde se reducen pérdidas por dispersión y se minimiza la contaminación lumínica. A pesar

de que su costo inicial puede ser mayor, su costo total de propiedad y gastos en mantenimiento es significativamente menor debido al ahorro energético y una vida útil amplia para recuperar la inversión de implementación con lo que se paga menos de esta energía [5].

Eficiencia Energética en Alumbrado Público: Estimando la ventaja energética asociada a la implementación de tecnología led, resalta la capacidad de generar menores pérdidas eléctricas, lo que representa entre el 50 % y el 60 % de ahorro energético en comparación con los sistemas de iluminación tradicionales. De la misma manera, el costo relacionado con mantenimientos específicos del funcionamiento de las mismas luminarias se reduce, con más de 10 años de operatividad, superando ampliamente las horas de operación de las lámparas incandescentes. Esto implica que, por cada 25 luminarias incandescentes que requerirían ser reemplazadas, sería necesario sustituir solo una luminaria led. Existen ciertas características físicas y parámetros eléctricos que condicionan el tipo de luminaria a utilizar, lo que en ocasiones dificulta la selección y la eficiencia de estas al ser instaladas. Estos datos están descritos en la tabla 1.1 [5].

Tabla 1.1. Características de las luminarias para alumbrado público

Características	Vapor de mercurio	Vapor de sodio alta presión	LED de alta potencia
Vida útil (horas)	25.000	18,000	≥100,000
Eficacia (lm/W)	60	100	≥130
Mantenimiento de lúmenes	Malo	Bueno	Bueno
Índice de rendimiento de color	46%	22%	70 - 90%
Temperatura de color (K)	4.100	1.900 - 2.200	2.700 - 5.700
Calor a disipar	46%	37%	75% - 85%

Encendido (min)	10	3-5	Al instante
Rendimiento (min)	3	1	Al instante

Fuente: Autor

1.5.2 Normativas y Estándares Aplicables

En Ecuador y a nivel internacional existen normas que regulan el alumbrado público. Algunas relevantes son:

- Norma INEN 2 190:2014: establece los niveles mínimos de iluminación para vías públicas.
- Reglamento Nacional de Eficiencia Energética.
- IEC 60598: que son normativas internacionales sobre luminarias y su uso.
- IESNA RP-8-14: guía para diseño de alumbrado vial en proyectos.
- ARCERNR-007/23: Regula el marco normativo del servicio de alumbrado público en Ecuador para su construcción, operación y mantenimiento. Además, brinda los parámetros base para constatar proyectos lumínicos en vías públicas.

Estas normativas aseguran que cualquier cambio en el sistema o gestión de proyectos, cumpla con requisitos de calidad, seguridad y eficiencia en el sector de alumbrado público, por lo que serán consideradas en el proyecto como medidas de contraste y viabilidad en varios puntos de vista.

1.5.3 Clases de alumbrados por vías.

Existen varias clases de alumbrado según el tipo de vía donde se realicen mediciones o proyectos.

Vías vehiculares: Según el "Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público" se evalúan parámetros como el uso de la carretera, flujo de personas en las vías y demás, lo que resulta en 5 niveles descritos en la tabla 1.2:

Tabla 1.2. Clase de iluminación según el tipo de vía

Tipo de vía	Clase de iluminación
Vías de alta velocidad con calzadas	M1
	M2
	M3
Vías de alta velocidad con doble sentido de circulación	M1
	M2
Vías con tráfico urbano	M2
	M3
Vías circunvalares y distribuidoras	M2
	M3
Conectores de vías de poca importancia	M4
	M5

Fuente: [5]

Vías con Tráfico motorizado: Comprende la clase de los niveles de iluminación y brillo, donde se ve afectada la selección de luminaria. Por ello se solicitan requerimientos mínimos de cómo debe distribuirse la iluminación dependiendo el sector. Esto se puede analizar en las tablas 1.3, 1.4 y 1.5.

Tabla 1.3. Requisito fotométrico mantenidos por la clase de iluminación para tráfico motorizado con base en la iluminancia de la calzada

Clase de iluminación	Campo de aplicación					
	Todas las Vías				Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con aceras no iluminadas para clases P1 a P4 (ver Tabla 6)
Luminancia promedio (cd /m ²) máx.	Luminancia promedio (cd /m ²) min	Factor de uniformidad U_o Mínimo	TI % Máxima inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia UL Mínimo	Relación de alrededores (SR) Mínima2	
M1	2.4	2	0.4	10	0.7	0.5
M2	1.8	1.5	0.4	10	0.7	0.5
M3	1.2	1.0	0.4	15	0.6	0.5
M4	1	0.75	0.4	15	0.6	0.5
M5	0.75	0.5	0.35	15	0.4	0.5
M6	0.5	0.30	0.35	20	0.4	0.5

Fuente: [2]

Tabla 1.4. Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal

Clase de Iluminación	Iluminancia (Ix)			Requisitos adicionales	
	Valor promedio horizontal	Valor promedio horizontal mínimo (*)	Valor horizontal mínimo (*)	Valor vertical	Valor semicilíndrica
P1	18	15	3	5.0	3.0
P2	12	10	2	3.0	2.0
P3	9.0	7.5	1.5	2.5	1.5
P4	7.5	5.0	1.0	1.5	1.0
P5	5.0	3.0	0.6	1.0	0.6
P6	3.0	2.0	0.4	0.6	0.4

Fuente: [2]

Tabla 1.5. Requisitos mínimos de iluminación para zonas de conflicto.

Clases de iluminación	Iluminancia horizontal promedio E (Ix) 5		Uniformidad de la iluminancia	Incremento de umbral (%) ⁶	
	Máxima	Mínima		Moderada y alta velocidad	Moderada y muy baja velocidad
C0	60	50	0.4	10	15
C1	36	30		10	15
C2	24	20		10	15
C3	20	15		15	20

C4	15	10		15	20
C5	10	7.5		15	25

Fuente: [2]

1.5.4 Ventajas y desventajas de usar luminaria led.

Ventajas

- Presenta mejor eficiencia energética
- Permiten una mejor entrega de luz efectiva ya que no se escapan rayos de luz
- Requieren menos costos relacionados a mantenimiento
- Ahorran valores de costo en la facturación de electricidad por valor de compra de energía.
- Se tardan menos tiempo en encenderse
- Genera iluminación uniforme [6].

Desventajas

- Genera luz al que puede causar deslumbramientos.
- Se debe calcular la caída de voltaje para evitar problemas en el sistema led y dimensionar protecciones.
- El reemplazo de piezas es complejo, debido al sistema tecnológico integrado.
- No es viable para distribuciones de luces esféricas y tienen alto costo [6].

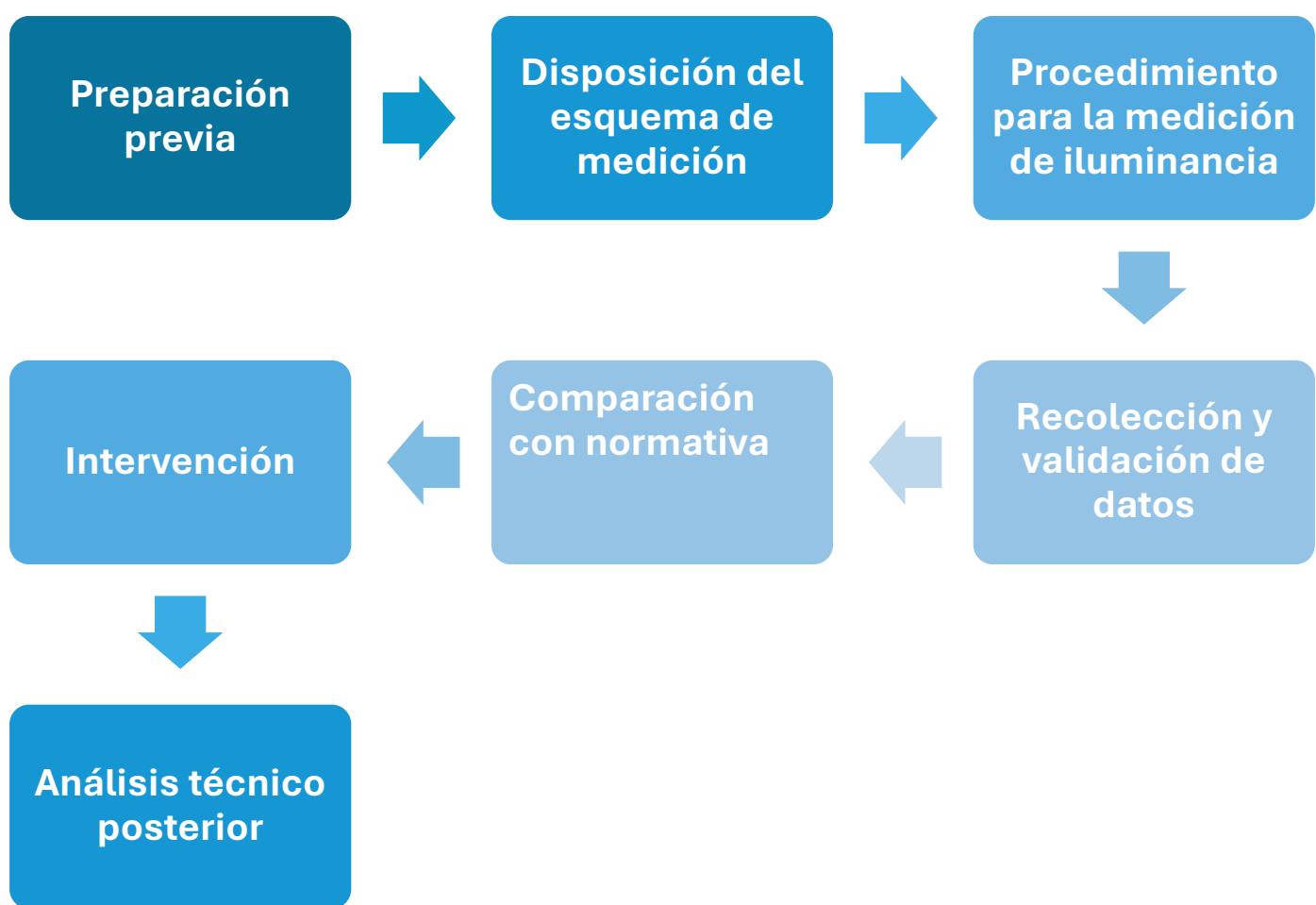
Capítulo 2

2. Metodología.

Para poder estructurar los pasos a seguir al momento de efectuar el cambio a luminaria led y analizar la viabilidad del proyecto, se consideraron todos los requisitos, parámetros, limitantes y variables que afectaban la recopilación de información antes, durante y después de las mediciones.

Estos puntos se esquematizan de manera general en la figura 2.1.

Figura 2.1. Pasos para realizar el cambio a luminaria led



Fuente: Autor

2.1. Formulación de alternativas y selección de solución

Para dar respuesta al problema planteado en este estudio, se formularon diversas alternativas de análisis. Una de ellas fue el uso de simulaciones teóricas y de mediciones técnicas de iluminancia en campo, contrastando el rendimiento de luminarias HPS frente a luminarias led.

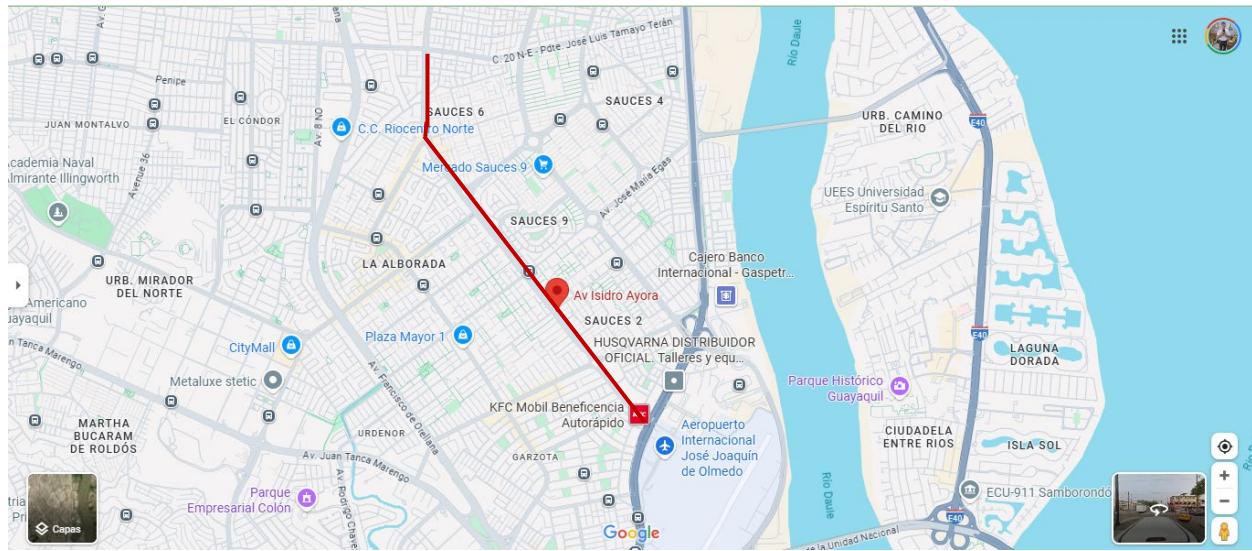
La alternativa seleccionada fue la evaluación técnica en sitio mediante mediciones con luxómetro, debido a su objetividad al ser experimental y su alineación con la normativa ARCEENR-007/23 que busca la distribución y suministro de energía para el alumbrado público, de tal manera que, se consigan niveles adecuados de luminancia con uniformidad en la iluminación de las vías públicas. Esta opción permitió obtener datos reales y verificables para un análisis comparativo ideal donde bajo las mismas circunstancias ambos sistemas de alumbrado fueron comparados.

2.2. Diseño conceptual y estrategia de identificación

El diseño de la estrategia metodológica consistió en la recolección de datos de iluminancia en tramos representativos de una vía piloto bajo condiciones ambientales estables (sin lluvias ni fuertes vientos), utilizando instrumentos calibrados tales como el luxómetro y telemetro.

Se identificaron los efectos imprescindibles a considerar en relación al tipo de luminaria, esto respondiendo a los niveles de iluminancia mediante el control de variables externas (clima, interferencia lumínica, deslumbramientos, zonas oscuras, operatividad y condiciones del equipo), por ello se tomaron las muestras en la noche. Esto permitió que cualquier diferencia registrada fuera descartada, realizando mediciones con alta confiabilidad dependiendo el tipo de tecnología que fue empleada en el alumbrado.

Figura 2.2. Ruta seleccionada



Fuente: Autor

La ruta seleccionada corresponde a lo largo de la Avenida Isidro Ayora, entre las avenidas Las Américas y José Luis Tamayo, donde la empresa eléctrica distribuidora realizó el cambio de un total de 300 luminarias dentro de esa avenida. La ruta seleccionada se detalla en la figura 2.2 usando Google maps.

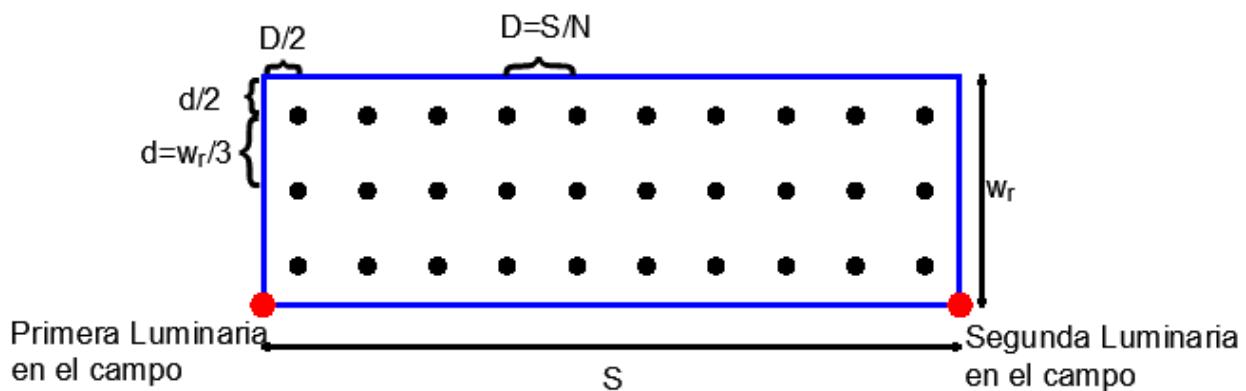
2.3. Diseño detallado de la metodología

Las mediciones se ejecutaron conforme a la norma INEN 2 190:2014 y la guía internacional IESNA RP-8-14, que evalúan el cumplimiento de los estándares, las posiciones y métodos de medición junto a los criterios de evaluación de iluminancia para vías públicas. Además, se usó la normativa ARCERNR-007/23 que detalla las responsabilidades que tiene la empresa eléctrica distribuidora de energía con el usuario final al proveer del servicio de alumbrado público independientemente la clase o característica de vías o sectores. Para organizar los pasos del proyecto antes, durante y después de las mediciones se desarrolló un proceso dividido en seis etapas principales que se detallan a continuación.

Preparación previa: Se seleccionó un tramo representativo de la vía piloto que en este caso fue la avenida Isidro Ayora. Se identificó el tipo y funcionamiento de las luminarias del sector seleccionado, donde las mediciones se efectuaron en la noche, evitando condiciones climáticas adversas. El luxómetro fue calibrado siguiendo las instrucciones del fabricante (GOSSEN MAVOLUX 5032B). Así mismo, se usaron implementos como el telemetro láser y flexómetro para mediciones de longitud.

Disposición del esquema de medición: Se adoptó un esquema de diez puntos de medición por sección transversal (centro, bordes y aceras), en tres secciones a lo largo del tramo (inicio, medio y fin). Para obtener los puntos correctos de medición de iluminancia se creó una plantilla con los datos y variables generales necesarios, los cuales deben regirse a la normativa ARCERNNR-007/23. La altura del sensor del luxómetro se mantuvo a 1 metro del suelo al momento de medir el parámetro en cada uno de los puntos obtenidos. Las fórmulas y detalle para conseguir los puntos de medición se describen a continuación en la figura 2.3:

Figura 2.3. Esquema de medición de luminancia



Fuente: Autor

Los puntos negros que se visualizan en la ilustración 2 se refieren a los lugares donde se deben tomar las medidas de luminancia con el luxómetro, siendo separados por distancias calculadas por las siguientes ecuaciones.

$$D = \frac{S}{N} \quad (2,1)$$

Donde:

D: Distancia de separación entre los puntos de medición en dirección longitudinal

S: Distancia de poste a poste

N: Número calculados de puntos en dirección longitudinal

Si $S \leq 30$ [m], N=10

Si $S \geq 30$ [m], N= el entero menor que resulte de la relación $\frac{S}{3}$ (2,2)

La primera fila de los puntos seleccionados siempre estará a $\frac{D}{2}$ de distancia, mientras que en dirección transversal (ancho del rectángulo) se consideraran 3 puntos separados a $d = \frac{W_r}{3}$ (2,3).

Donde:

d: espacio de separación de los puntos en dirección transversal

W_r : Ancho de la calzada seleccionada

Procedimiento de medición: En cada punto se estabilizó la lectura por 5 a 10 segundos antes de registrar el valor. Se utilizaron fichas técnicas para recopilar información contextual del sitio y del sistema eléctrico tal y como se muestra desde la tabla 2.1 a la 2.6.

Recolección y validación de datos: Se revisaron las mediciones, repitiendo aquellas con valores anormales, interferencias o datos aberrantes. Se documentaron observaciones especiales

como luminarias apagadas u obstáculos. Según la normativa ARCERNR-007/23 los valores límites de iluminancia para una vía M2 son de 18 a 22 luxes. Se realizaron mediciones de luminancia tanto para las lámparas de sodio antes del cambio y para las lámparas leds luego del reemplazo.

Tabla 2.1. Ficha técnica para medición de iluminancia

FICHA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN VÍA PÚBLICA				
Evaluador:				
Dirección:				
Fecha:				
Hora:				
INFORMACIÓN ELÉCTRICA				
Voltaje del circuito:				
Tap del balasto:				
TRAFO:	kVA:		Nro.:	
CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA				
Interdistancia (m):				
Altura de montaje (m):				
Tipo de calzada:				
Número de carriles:				
Acera 1 (m):				
Acera 2 (m):				
Parterre central (m):				
Ancho total de la vía (m):				

Ubicación del poste desde el borde de calzada (m):					
Longitud del brazo (m):					
Clase de Alumbrado (M1...M6):					
LUMINARIA					
	Tipo	Modelo		Potencia (W)	
Configuración:					
COORDENADAS					
	X		Y		
Coordenadas:					
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
Nombre Archivo APP:					
DATOS DEL EQUIPO					
Modelo:					
Nº de Serie:					
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
	1	2	3	4	5
B					
C					
D					
	6	7	8	9	10
B					

C					
D					
OBSERVACIONES					

Fuente: Autor

Tabla 2.2. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias de sodio

FICHA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN VÍA PÚBLICA				
Evaluador:	Francisco Larrea-Bryan Holguín			
Dirección:	Avenida Isidro Ayora			
Fecha:	11-07-2025			
Hora:	20:00			
INFORMACIÓN ELÉCTRICA				
Voltaje del circuito:	240			
Tap del balasto:	-			
TRAFO:	kVA:	50	Nro.	-
CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA				
Interdistancia (m):	32,80			
Altura de montaje (m):	12,85			
Tipo de calzada:	Asfalto			
Número de carriles:	2			
Acera 1 (m):	1.85			
Acera 2 (m):	2.85			
Parterre central (m):	10.44			

Ancho total de la vía (m):	9,83				
Ubicación del poste desde el borde de calzada (m):	1,83				
Longitud del brazo (m):	3				
Clase de Alumbrado (M1...M6):	M2				
LUMINARIA					
	Tipo	Modelo	Potencia (W)		
Configuración:	Sodio	Layrton	400		
COORDENADAS					
	X		Y		
Coordenadas:	-2.138706		-79.891107		
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
Nombre Archivo APP:	-		-		
DATOS DEL EQUIPO					
Modelo:	GOSSEN MAVOLUX 5032B				
Nº de Serie:	1C32125				
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
	1	2	3	4	5
B	22.3	22.2	16.70	20.1	21.3
C	21.9	19.60	20	17.8	19.9
D	17.72	16.63	16.70	15.71	28.2

	6	7	8	9	10
B	22.8	27.7	28.4	29.9	22.8
C	23	28.8	28.2	29.3	20.5
D	21.2	25.1	27.3	23.8	19.30
OBSERVACIONES					
Esta calzada corresponde a la parte central de la vía					

Fuente: Autor

Tabla 2.3. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias de sodio

FICHA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN VÍA PÚBLICA							
Evaluador:	Francisco Larrea-Bryan Holguín						
Dirección:	Avenida Isidro Ayora						
Fecha:	11-07-2025						
Hora:	20:30						
INFORMACIÓN ELÉCTRICA							
Voltaje del circuito:	240						
Tap del balasto:	-						
TRAFO:	kVA:	50	Nro.	-			
CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA							
Interdistancia (m):	30						
Altura de montaje (m):	8.53						
Tipo de calzada:	Asfalto						
Número de carriles:	1						

Acera 1 (m):	0.20				
Acera 2 (m):	-				
Parterre central (m):	10.44				
Ancho total de la vía (m):	10.70				
Ubicación del poste desde el borde de calzada (m):	0.20				
Longitud del brazo (m):	2.50				
Clase de Alumbrado (M1...M6):	M2				
LUMINARIA					
	Tipo	Modelo	Potencia (W)		
Configuración:	Sodio	Layrton	400		
COORDENADAS					
	X	Y			
Coordenadas:	-2.138680	-79.891657			
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
Nombre Archivo APP:	-	-			
DATOS DEL EQUIPO					
Modelo:	GOSSEN MAVOLUX 5032B				
Nº de Serie:	1C32125				
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
	1	2	3	4	5

B	54	39	35.5	31	40.7
C	42	32.6	25.4	27.6	24.9
D	24	15.84	14.34	22.7	37.5
	6	7	8	9	10
B	19	43.2	54.6	60.5	36.3
C	28.5	30.7	39.7	57.2	80.3
D	23.8	22.9	22.2	29.5	86.4
OBSERVACIONES					
Esta calzada corresponde a la parte izquierda de la vía					

Fuente: Autor

Tabla 2.4. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias de sodio

FICHA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN VÍA PÚBLICA							
Evaluador:	Francisco Larrea-Bryan Holguín						
Dirección:	Avenida Isidro Ayora						
Fecha:	11-07-2025						
Hora:	21:00						
INFORMACIÓN ELÉCTRICA							
Voltaje del circuito:	240						
Tap del balasto:	-						
TRAFO:	kVA:	50	Nro.	-			
CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA							
Interdistancia (m):	32						

Altura de montaje (m):	8.60		
Tipo de calzada:	Asfalto		
Número de carriles:	1		
Acera 1 (m):	0.25		
Acera 2 (m):	-		
Parterre central (m):	10.65		
Ancho total de la vía (m):	10.90		
Ubicación del poste desde el borde de calzada (m):	0.26		
Longitud del brazo (m):	2.90		
Clase de Alumbrado (M1...M6):	M2		
LUMINARIA			
	Tipo	Modelo	Potencia (W)
Configuración:	Sodio	Layrton	400
COORDENADAS			
	X	Y	
Coordenadas:	-2.140648	-79.890094	
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)			
Nombre Archivo APP:	-	-	
DATOS DEL EQUIPO			
Modelo:	GOSSEN MAVOLUX 5032B		

Nº de Serie:	1C32125				
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
	1	2	3	4	5
B	29.6	25	22.5	23	25
C	34.5	28.8	23.9	21.8	20
D	27.7	22.6	21.4	22.7	20.4
	6	7	8	9	10
B	24.5	24.6	24.8	26.5	28
C	21	22.1	24.6	29.1	29.6
D	21.5	20.2	22.4	20.5	23.5
OBSERVACIONES					
Esta calzada corresponde a la parte derecha de la vía					

Fuente: Autor

Tabla 2.5. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias tipo led

FICHA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN VÍA PÚBLICA	
Evaluador:	Francisco Larrea-Bryan Holguín
Dirección:	Avenida Isidro Ayora
Fecha:	16-07-2025
Hora:	20:00
INFORMACIÓN ELÉCTRICA	
Voltaje del circuito:	240

Tap del balasto:	-			
TRAFO:	kVA:	50	Nro.	-
CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA				
Interdistancia (m):	32			
Altura de montaje (m):	12.82			
Tipo de calzada:	Asfalto			
Número de carriles:	2			
Acera 1 (m):	1.85			
Acera 2 (m):	2.85			
Parterre central (m):	7.97			
Ancho total de la vía (m):	9.82			
Ubicación del poste desde el borde de calzada (m):	1.63			
Longitud del brazo (m):	2			
Clase de Alumbrado (M1...M6):	M2			
LUMINARIA				
	Tipo	Modelo	Potencia (W)	
Configuración:	Led	Sylvania	150	
COORDENADAS				
	X		Y	
Coordenadas:	-2.138680		-79.891657	
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)				

Nombre Archivo APP:	-	-			
DATOS DEL EQUIPO					
Modelo:	GOSSEN MAVOLUX 5032B				
Nº de Serie:	1C32125				
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
	1	2	3	4	5
B	74.2	64	49	44	39.1
C	69	62.6	57	45	39
D	60	57	54	41	35.6
	6	7	8	9	10
B	38	40	38	55	66
C	37	37	40	52	55
D	32.3	35	38	51	60
OBSERVACIONES					
Esta calzada corresponde a la parte derecha de la vía					

Fuente: Autor

Tabla 2.6. Tabulación de datos de iluminancia para luminarias tipo led

FICHA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN VÍA PÚBLICA	
Evaluador:	Francisco Larrea-Bryan Holguín
Dirección:	Avenida Isidro Ayora
Fecha:	16-07-2025

Hora:	20:30			
INFORMACIÓN ELÉCTRICA				
Voltaje del circuito:	240			
Tap del balasto:	-			
TRAFO:	kVA:	50	Nro.	-
CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA				
Interdistancia (m):	30			
Altura de montaje (m):	12.82			
Tipo de calzada:	Asfalto			
Número de carriles:	1			
Acera 1 (m):	0.20			
Acera 2 (m):	-			
Parterre central (m):	10.44			
Ancho total de la vía (m):	10.70			
Ubicación del poste desde el borde de calzada (m):	0.20			
Longitud del brazo (m):	2.50			
Clase de Alumbrado (M1...M6):	M2			
LUMINARIA				
	Tipo	Modelo	Potencia (W)	
Configuración:	Led	Sylvania	150	
COORDENADAS				

	X	Y			
Coordenadas:	-2.138706	-79.891107			
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
Nombre Archivo APP:	-	-			
DATOS DEL EQUIPO					
Modelo:	GOSSEN MAVOLUX 5032B				
Nº de Serie:	1C32125				
DATOS DE MEDICIÓN (LUXES)					
	1	2	3	4	5
B	95	67	47	37	24.4
C	66	62	42	31	37
D	63	52.5	40	27	33
	6	7	8	9	10
B	35.2	25.7	45	55	59
C	34.5	23.7	38	46	49
D	33	22.9	45	32	43
OBSERVACIONES					
Esta calzada corresponde a la parte izquierda de la vía					

Fuente: Autor

Comparación con normativas: Los datos fueron contrastados con los valores mínimos de iluminancia establecidos por la norma INEN 2 190:2014 para determinar el cumplimiento de los estándares, donde se establece un límite de 20 a 30 luxes para evitar contaminación visual. El dato

que se contrastó fue el promedio de los valores obtenido de iluminancia en luxes, donde por cada caso se obtuvo un resultado regido por las normativas.

Para la tabulación de datos de iluminancia en luminarias de sodio en la parte central de la vía se obtuvo el siguiente valor promedio de iluminancia:

$$E_m = \sum \frac{\text{Suma de los valores de iluminancia}}{\text{total de mediciones}} \quad (2.4)$$

$$E_m = \sum \frac{\text{Suma de los valores de iluminancia}}{\text{total de mediciones}} = \frac{674.86}{30} = 22.49[\text{lx}]$$

Para la tabulación de datos de iluminancia en luminarias de sodio en la parte izquierda de la vía se obtuvo el siguiente valor promedio de iluminancia:

$$E_m = \sum \frac{\text{Suma de los valores de iluminancia}}{\text{total de mediciones}} = \frac{1091.88}{30} = 36.39[\text{lx}]$$

Para la tabulación de datos de iluminancia en luminarias de sodio en la parte derecha de la vía se obtuvo el siguiente valor promedio de iluminancia:

$$E_m = \sum \frac{\text{Suma de los valores de iluminancia}}{\text{total de mediciones}} = \frac{742.2}{30} = 24.74[\text{lx}]$$

Para la tabulación de datos de iluminancia en luminarias led en la parte derecha de la vía se obtuvo el siguiente valor promedio de iluminancia:

$$E_m = \sum \frac{\text{Suma de los valores de iluminancia}}{\text{total de mediciones}} = \frac{1464.6}{30} = 48.82[\text{lx}]$$

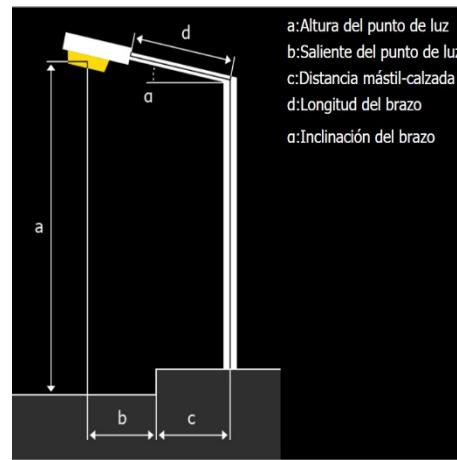
Para la tabulación de datos de iluminancia en luminarias led en la parte izquierda de la vía se obtuvo el siguiente valor promedio de iluminancia:

$$E_m = \sum \frac{\text{Suma de los valores de iluminancia}}{\text{total de mediciones}} = \frac{1310.9}{30} = 43.69[\text{lx}]$$

Análisis técnico posterior: Se calcularon indicadores estadísticos como la media de las mediciones por luminaria. Adicionalmente, se compararon las tendencias de perfiles de iluminancia y se contrastaron los resultados entre tecnologías hps y led. Para este análisis se consideró evaluar 3 indicativos importantes con el fin de determinar la viabilidad del cambio de luminaria. Dentro del primer indicativo se encuentra la potencia, corriente y energía de consumo en el intervalo de encendido de cada tipo de luminaria (400 Watts y 150 Watts para luminarias de sodio y led respectivamente) bajo las mismas condiciones, con ello se analizó el consumo de reactivos de cada circuito. El segundo indicativo se lo obtuvo con la simulación del sistema usando circuitos similares a los datos medidos de las lámparas de sodio y led de manera independiente, donde se realizaron cambios en la posición y altura de las luminarias para identificar en qué caso resultaría más eficiente la emisividad de luz luego del reemplazo. Como la avenida seleccionada es considerada de categoría M2 y el proyecto está regido a las normas INEN 2 190:2014 y ARCERNR-007/23, el rango de luminancia va de 20 a 30 luxes según los estándares.

Para las simulaciones de ambos sistemas de alumbrado, se usó la herramienta DIALux, programa en el que se registraron los parámetros físicos de las aceras y postes para que se generen las proyecciones de luz necesarias que cumplieran con la normativa vigente. Se usaron los valores medidos en sitio en conjunto a la ficha técnica que está diseñada en base a los cálculos para conseguir los puntos de medición. Los parámetros considerados en este análisis se esquematizan en la figura 2.4.

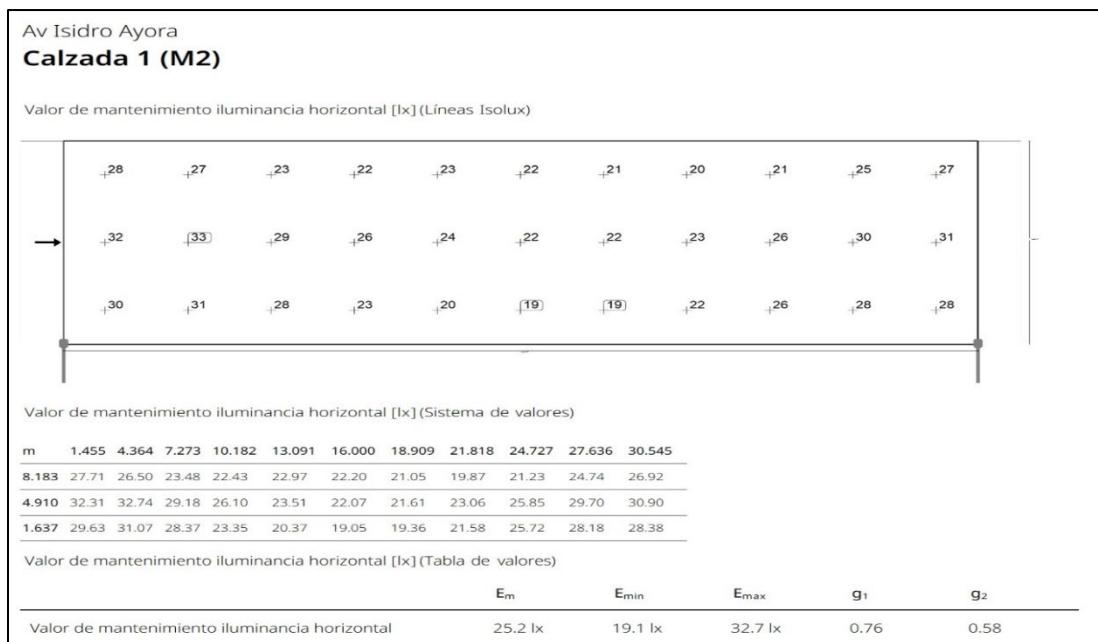
Figura 2.4. Parámetros de las luminarias considerados en el software DIALux



Fuente: Autor

Para la luminaria en base a lámparas led se simuló un tramo de la vía Isidro Ayora, donde los resultados de iluminancia se presentan en las figuras 2.5, 2.6 y 2.7.

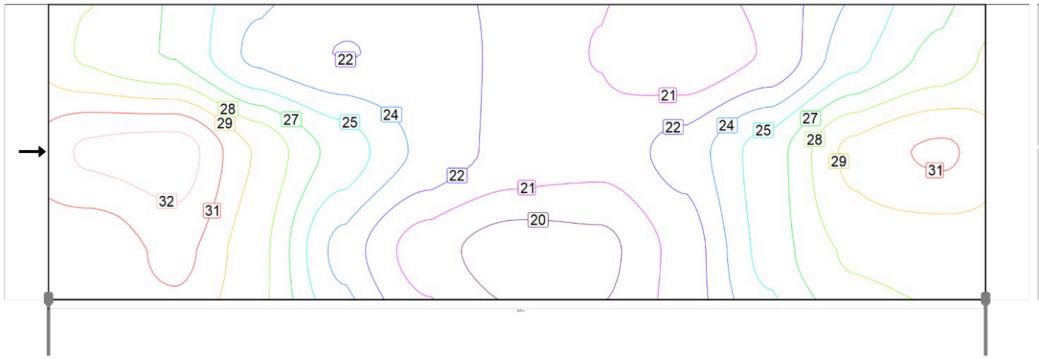
Figura 2.5. Simulación de valores de iluminancia según los puntos de medición



Fuente: Autor

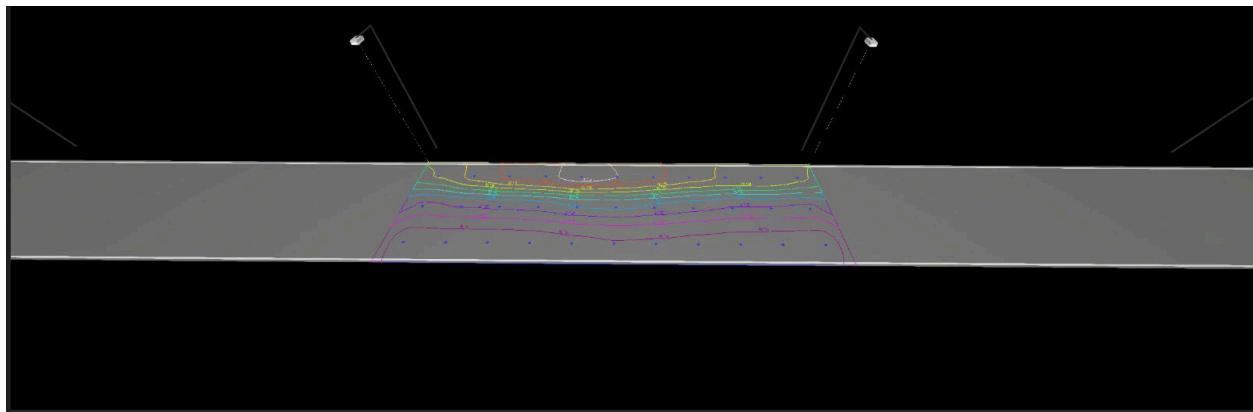
Figura 2.6. Aprobación de los datos de proyección lumínica simulada

	Tamaño	Calculado	Nominal	Verificación
Observador 1	L_m	1.66 cd/m ²	≥ 1.50 cd/m ²	✓
Posición: -60.000 m, 4.910 m, 1.500 m	U_o	0.54	≥ 0.40	✓
	U_l	0.71	≥ 0.70	✓
	TI	8 %	≤ 10 %	✓



Fuente: Autor

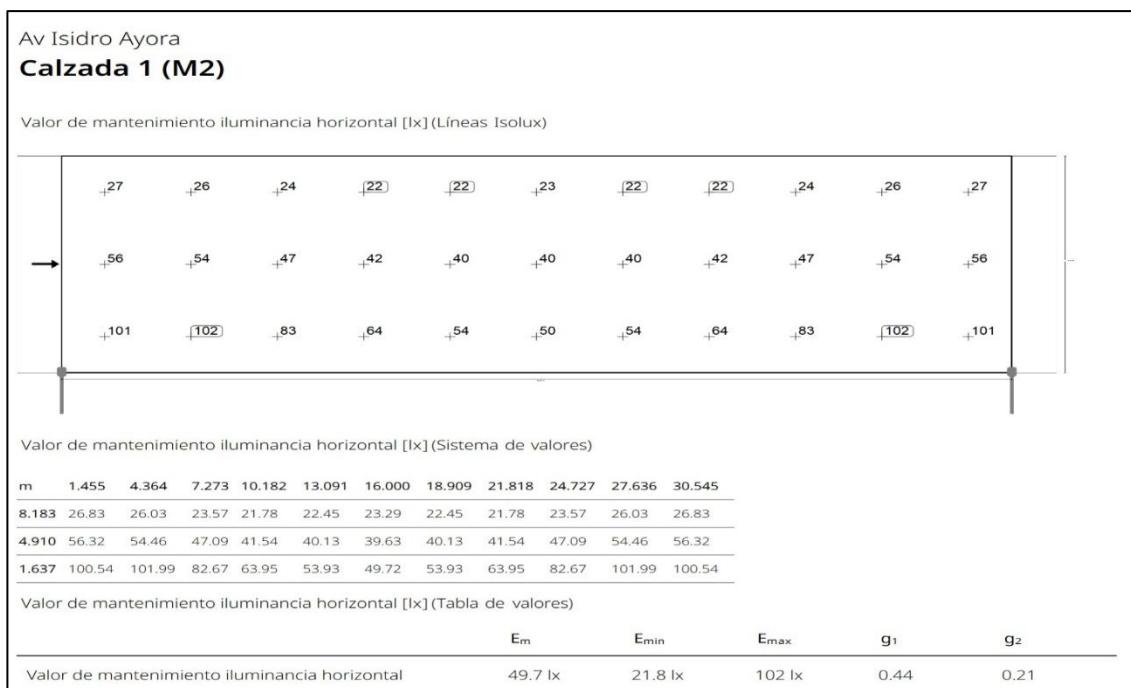
Figura 2.7. Modelo en 3D de la vía simulada con luminarias led



Fuente: Autor

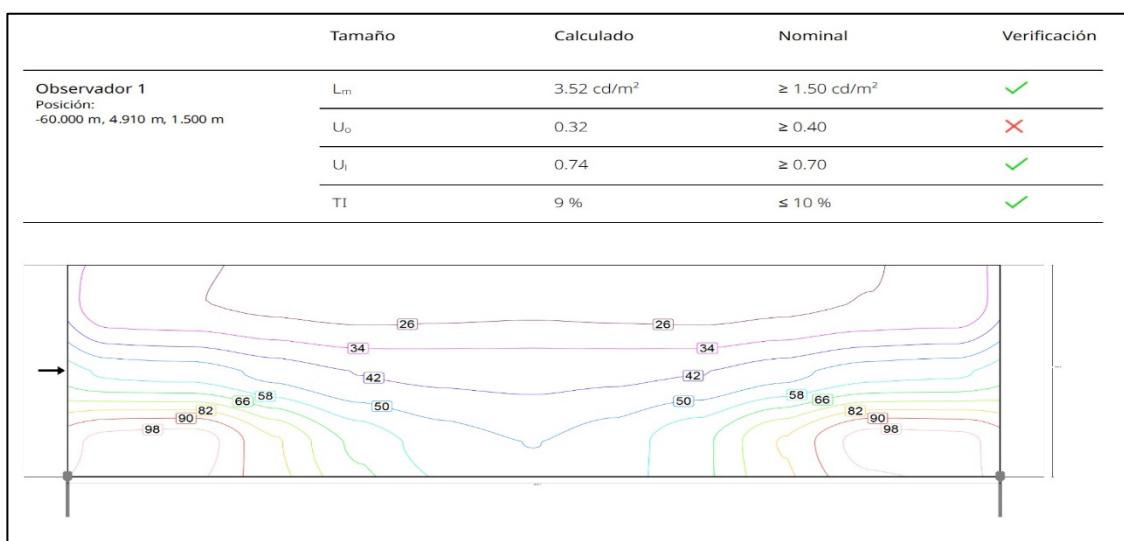
Para la luminaria en base a lámparas de sodio se simuló un tramo de la vía Isidro Ayora, donde los resultados de iluminancia se presentan en las ilustraciones 2.8, 2.9 y 2.10.

Figura 2.8. Simulación de valores de iluminancia según los puntos de medición



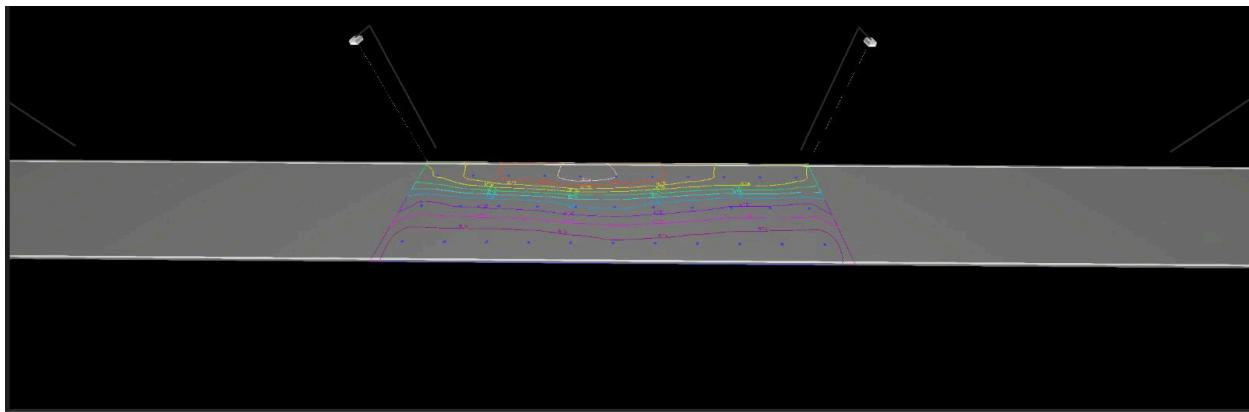
Fuente: Autor

Figura 2.9. Aprobación de los datos de proyección lumínica simulada



Fuente: Autor

Figura 2.10. Modelo en 3D de la vía simulada con luminarias de sodio



Fuente: Autor

Intervención: La unidad de análisis fue cada punto de medición dentro del tramo vial seleccionado, durante la toma de mediciones la empresa eléctrica distribuidora realizó el cambio de luminarias donde se consiguió obtener los datos de placa de las lámparas de sodio que fueron dadas de baja y de las lámparas leds. Al tomar las mediciones de luminancia de lámparas leds posterior al cambio que se registraron como ejemplo en las tablas 9 y 10, se identificaron modificaciones en el circuito ya que se redujo el número de luminarias lo que afectó la recolección de datos y se tuvieron que escoger puntos estratégicos para el registro y simulación. Los datos nominales de placa de cada luminaria se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Parámetros eléctricos de las luminarias antes y después del cambio

Tipo de luminaria	HPS (Sodio)	Led
Marca	LAYRTON	SYLVANIA
Potencia (W)	400	150
Corriente (A)	4,45	4.20
Voltaje (V)	240	240

Fuente: Autor

Capítulo 3

3.1 Análisis Lumínico

Tabla 3.1. Parámetros lumínicos simulados

Parámetro		Sodio 400 W	LED 150 W	Requisito	Cumple Sodio / LED	
Luminancia Media (L_m)		3.52 cd/m ²	1.66 cd/m ²	≥ 1.50 cd/m ²		
Uniformidad General (U₀)		0.32	0.54	≥ 0.40		
Uniformidad Longitudinal (U₁)		0.74	0.71	≥ 0.70		
Índice de Deslumbramiento (TI)		9%	8%	$\leq 10\%$		

Fuente: Autor

Usando el software DIAlux para la simulación de proyección lumínica, se obtuvo un resumen de los resultados, donde se evidencia que tanto para la distribución de luz general con menor cantidad de zonas oscuras (uniformidad general), distribución de luz a lo largo de la carretera considerando el brillo (uniformidad longitudinal) y el índice de deslumbramiento, la simulación con luminaria led presenta mejores datos según la normativa ARCERNR-007/23 por sobre las lámparas de sodio, proporcionando mayor uniformidad y menor deslumbramiento tal y como se muestra en la tabla 3.1.

Según los datos medidos con el luxómetro de manera experimental, se obtuvieron los siguientes parámetros descritos en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros de uniformidad de iluminancia medidos

Parámetro/Tipo de luminaria	Sodio	Led
Uniformidad general U_o [lx]	0.43	0.45
Uniformidad longitudinal U_l [lx]	0.72	0.73

Fuente: Autor

Donde:

$$U_o = \frac{\text{iluminancia mínima}}{\text{iluminancia media}} \quad (3,1)$$

$$U_l = \frac{\text{iluminancia mínima}}{\text{iluminancia máxima}} \quad (3,2)$$

Usando las tabulaciones en el capítulo anterior y recopilando los valores de las mediciones (20 mediciones entre luminarias de sodio y led) se obtienen los siguientes valores de iluminancia mínima, media y máxima:

Iluminancia mínima lámparas de sodio: 12.2 [lx]

Iluminancia media lámparas de sodio: 27.87 [lx]

Iluminancia máxima lámparas de sodio: 86.40 [lx]

Iluminancia mínima lámparas led: 21 [lx]

Iluminancia media lámparas led: 46.26 [lx]

Iluminancia máxima lámparas led: 137 [lx]

Bajo estos datos, la luminaria led que se encuentra actualmente en la vía seleccionada proporciona un mayor nivel de uniformidad lumínica después del cambio, haciendo que el sector se vea más iluminado en sectores donde no existía una buena repartición de luz con las lámparas

halógenas. Además, los niveles de deslumbramiento son menores, haciendo que lugares con presencia de árboles o elementos que generen sombra aún se vean alumbrados.

3.2 Análisis Energético y Económico

Para el análisis económico y energético se compararon los valores de consumo por dato de placa de cada equipo según el tipo de luminaria, además de un estimado de horas en las cuales los dispositivos se encuentran operando, primero se consideraron los valores nominales de cada luminaria tal y como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Consumo anual de energía y costo por luminaria

Tecnología	Potencia	Consumo Anual (kWh)	Costo Anual
Sodio	400 W	1752 kWh	\$ 82.203
LED	150 W	657 kWh	\$ 30.83

Fuente: Autor

3.2.1 Consumo anual

Se efectuaron cálculos de consumo de energía y costo con mediciones de corriente en los talleres de alumbrado público y Sylvania que son los fabricantes de las luminarias halógenas de sodio y led respectivamente, tales consideraciones se describen a continuación y los parámetros eléctricos calculados fueron registrados en la tabla 3.4.

Supuestos:

- ✓ Horas de funcionamiento diario: 12 h
- ✓ Días al año: 365
- ✓ Cantidad de luminarias: 300
- ✓ Costo de compra de energía eléctrica CNEL Guayaquil:

$$\frac{25,157,709.40 \text{ USD}}{536,194.90 \text{ MWh}} = 0.04692 \frac{\text{USD}}{\text{KWh}} \quad (3.3)$$

- ✓ Vida útil LED: 100,000 h, que equivale a 10 años aproximadamente
- ✓ Vida útil sodio: 18,000 h, que equivale a 2 años aproximadamente
- ✓ Costo unidad led 150 W: \$298
- ✓ Costo unidad sodio 400 W + balastro: \$170
- ✓ Consumo real unidad halógena de sodio: $238 \text{ [V]} \times 2.1 \text{ [A]} \times 0.95 = 475 \text{ [W]}$
- ✓ Consumo real unidad led: $238 \text{ [V]} \times 0.67 \text{ [A]} \times 0.95 = 151 \text{ [W]}$

Tabla 3.4. Consumo anual de energía y costo por luminaria

Tecnología	Potencia	Consumo Anual (kWh)	Costo Anual energía
Sodio	475 W	2080.5 kWh	\$ 97.617
LED	151 W	661.38 kWh	\$ 31.031

Fuente: Autor

Luminarias de sodio (475 W)

Corriente de línea Total

$$P_{Total} = (300)(475) \quad (3.4)$$

$$P_{Total} = 142500 \text{ W} = 142.500 \text{ kW}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{142500}{238}$$

$$I = 598.74 \text{ A}$$

Resistencia del conductor (Ida y vuelta)

$$R = \rho \frac{L}{s} \quad (3,5)$$

Datos:

$$\rho = 2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$s = 67.4 \text{ mm}^2$$

L : Longitud total de la línea ida y vuelta

Distancia promedio entre poste y poste: 30 m.

Numero de luminarias: 300 unidades.

$$L = (30 \text{ m})(300 - 1) \quad (3,6)$$

$$L = 8970 \text{ m}$$

$$L_{Total} = (2)(8,970) = 17940 \text{ m}$$

Resistencia Total

$$R = 2.8 \times 10^{-8} \frac{17,940}{6.74 \times 10^{-5}} \quad (3,7)$$

$$R = 7.45 \Omega$$

Perdidas por efecto Joule

$$P_{pérdidas} = I^2 R = (2.1)^2 (7.45) \quad (3,8)$$

$$P_{pérdidas} = 32.8585 \text{ W}$$

Energía útil anual

$$E_{util} = (475 \text{ W})(12)(365)(300) \quad (3,9)$$

$$E_{util} = 624150 \text{ kWh}$$

Energía perdida anual

$$E_{pérdidas} = (32.8585 \text{ W}) (12)(365)(300) \quad (3,10)$$

$$E_{pérdidas} = 43176.069 \text{ kWh}$$

Luminarias Led

Corriente de línea Total

$$P_{Total} = (300)(151)$$

$$P_{Total} = 45,300 \text{ W} = 45.3 \text{ kW}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{45,300}{238}$$

$$I = 190.33 \text{ A}$$

Resistencia del conductor (Ida y vuelta)

$$R = \rho \frac{L}{s}$$

Datos:

$$\rho = 2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$s = 67.4 \text{ mm}^2$$

Longitud total de la línea ida y vuelta

Distancia promedio entre poste y poste 30 m.

Numero de luminarias 300 unidades.

$$L = (30 \text{ m})(300 - 1)$$

$$L = 8,970 \text{ m}$$

$$L_{Total} = (2)(8,970) = 17,940 \text{ m}$$

Resistencia Total

$$R = 2.8 \times 10^{-8} \frac{17,940}{6.74 \times 10^{-5}}$$

$$R = 7.45 \Omega$$

Perdidas por efecto Joule

$$P_{pérdidas} = I^2 R = (0.67)^2 (7.45)$$

$$P_{pérdidas} = 3.344 \text{ W}$$

Energía útil anual

$$E_{util} = (151 \text{ W})(12)(365)(300)$$

$$E_{util} = 198414 \text{ kWh}$$

Energía perdida anual

$$E_{pérdidas} = (3.344 \text{ W}) (12) (365) (300)$$

$$E_{p\acute{e}rdidas} = 4394.416 \text{ kWh}$$

Resumen Comparativo

En la tabla 3.5 se muestra el resumen de la energía y dinero ahorrados por consumo en todo el año, considerando solamente el cambio de las 300 luminarias.

Tabla 3.5. Comparativa energética y económica

Concepto	Sodio 475W	LED 151W	Diferencia (Ahorro)	Costo del Ahorro
Energía útil anual (kWh)	624150 kWh	198414 kWh	425736 kWh	\$ 19975.53
Energía perdida anual (kWh)	43176.069 kWh	4394.416 kWh	38781.653 kWh	\$ 1819.64
Energía total anual (kWh)	667326.069 kWh	202808.416 kWh	464517.653 kWh	\$ 21795.17
Costo anual total (USD)	\$ 31310.94	\$ 9515.77	\$ 21795.17	

Fuente: Autor

Para calcular el Valor Actual Neto (VAN) y el Tasa Interna de Retorno (TIR), necesitamos los flujos de caja anuales (ahorros) y la tasa de descuento. Vamos a usar las siguientes fórmulas:

Valor Actual Neto

El VAN se calcula como la suma de los flujos de caja descontados a valor presente, menos la inversión inicial.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (3,11)$$

Donde:

- F_t = Flujo de caja en el año t

- i = Tasa de descuento (usualmente la tasa mínima de rendimiento o el costo capital)
- t = Año (1,2, 3, ...,n)
- I_0 = Inversión inicial

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Se resuelve de la siguiente forma:

$$0 = \sum \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \quad (3,12)$$

Suposiciones para este cálculo:

- **Inversión inicial (I_0):** En este caso, la inversión se puede asumir como la diferencia entre los costos de instalar luminarias de sodio y LED. Podemos calcularlo si se sabe el costo de cada luminaria y el número de luminarias.
- **Ahorro anual:** Es la diferencia entre el costo de operar las luminarias de sodio y las de LED, que calculamos anteriormente como \$ 19975.53
- **Tasa de descuento (i):** Supongamos un valor del 5% anual para la tasa de descuento.

Cálculos para el VAN

Datos

Costo por luminaria LED = \$298

Unidades de luminarias LED = 300 unidades

Precio energía útil anual (kWh) = \$ 19975.53.

Precio energía perdida anual (kWh) = \$ 1819.64

Donde:

- $F_t = \$ 19975.53 + \$ 1819.64 = \$ 21795.17$
- $i = 5\%$
- $t = 10$
- $I_0 = (300)(298) = \$ 89400$

$$VAN = \sum_{t=1}^{20} \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0$$

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{21795.17}{(1+0.05)^t} = 20,757.32$$

$$VAN = \sum_{t=2}^{10} \frac{21795.17}{(1+0.05)^t} = 40,546.55$$

$$VAN = \sum_{t=3}^{10} \frac{21795.17}{(1+0.05)^t} = 59,353.65$$

$$VAN = \sum_{t=4}^{10} \frac{21795.17}{(1+0.05)^t} = 77,284.59$$

$$VAN = \sum_{t=10}^{10} \frac{21795.17}{(1 + 0.05)^t} = 168,296.525$$

$$VAN = 168,296.525 - 89400 = 78896.525$$

Nuestro **VAN** al año 10 sería de **\$78896.525**

Cálculos para el **TIR**

$$0 = \sum_{t=1}^{20} \frac{F_t}{(1 + r)^t} - I_0$$

$$0 = \sum_{t=1}^{10} \frac{21795.17}{(1 + i)^t} - 89400$$

Para encontrar el **TIR** (tasa interna de rentabilidad) de forma manual, se utilizó una calculadora gráfica la cual nos otorgó un valor de $i=0.2064$ que corresponde al 20.64% de rentabilidad, como este valor es mayor al 5% correspondiente a la tasa del descuento, el proyecto resulta rentable

Entonces nuestro **TIR =20.64%**

Cálculos para el **PAYBACK**

Para obtener la cantidad de años en la que se recuperará el dinero de la inversión, se registraron valores de flujo para poder conseguir el Payback, tal y como se muestra en la tabla 3.6. En este apartado, el objetivo fue determinar si se recuperaría el dinero antes de que se cumpla el tiempo de vida útil de las luminarias led.

Tabla 3.6. Cálculo del Payback

Año	Flujo neto (\$)	Flujo ajustado (\$)	Flujo acumulado (\$)
0	-89400	-	-89400
1	21795.17	21795.17/1.05=20757.304	-68642.695
2	21795.17	21795.17/(1.05) ² =19768.862	-48873.833
3	21795.17	21795.17/(1.05) ³ =18827.487	-30046.346
4	21795.17	21795.17/(1.05) ⁴ =17930.940	-12115.405
5	21795.17	21795.17/(1.05) ⁵ =17077.086	4961.681
6	21795.17	21795.17/(1.05) ⁶ =16263.891	21225.572
7	21795.17	21795.17/(1.05) ⁷ =15489.420	36714.992
8	21795.17	21795.17/(1.05) ⁸ =14751.829	51466.821
9	21795.17	21795.17/(1.05) ⁹ =14049.361	65516.182
10	21795.17	21795.17/(1.05) ¹⁰ =13380.343	78896.525

Fuente: Autor

$$Payback = \text{último año de caja negativo} + \frac{\text{último flujo acumulado}}{\text{Primer flujo de caja (+)}} \quad (3,13)$$

$$Payback = 4 + \frac{12115.405}{17077.086} = 4 + 0.71 = 4.71 \text{ años}$$

Esto indica que a los 4 años con 9 meses se recuperará la inversión inicial correspondiente al precio de las luminarias led, lo que representa un tiempo prudente considerando el tiempo de vida útil de este tipo de luminarias de aproximadamente 10 años.

3.2.2 Ahorro energético

El reemplazo de las luminarias de sodio de 475 W a luminarias led de 151 W representa una eficiencia energética efectiva, porque el sistema de luminarias reemplazadas de sodio consumen alrededor de 624,150 kWh al año en comparación con el consumo de las led que es alrededor de 198,414 kWh esto nos representa un ahorro de 425,736 kWh por la cantidad de luminarias cambiadas que en este caso son consideradas 300, además se consideraron las pérdidas

de línea por cada circuito de luminaria para hacer más preciso el consumo general de energía por los tramos cambiados. Esta disminución del consumo energético ayuda a reducir la carga sobre la red eléctrica y fomenta un sistema de alumbrado público más sostenible y responsable con el medio ambiente.

3.2.3 Ahorro Económico

De acuerdo con los datos otorgados por la agencia de regulación y control de electricidad en Sisdat-BI, el precio por el cual paga Cnel por consumo de energía es de (USD 0.04692 por kWh consumido). El costo por el funcionamiento de las 300 luminarias de sodio es alrededor de \$31,310.94 por año disipando aproximadamente 667,326.069 kWh. Posterior al cambio de las luminarias, las que se reemplazaron por sistema led tienen un costo de operación de \$9,515.77 por año consumiendo 202,808.416 kWh, esto considerando la energía y las pérdidas respectivas de cada tipo de luminaria por circuito. La sustitución a sistema led representa un ahorro económico por año de \$21,795.17 consumiendo 464,517.653 kWh solo considerando las 300 luminarias cambiadas [7].

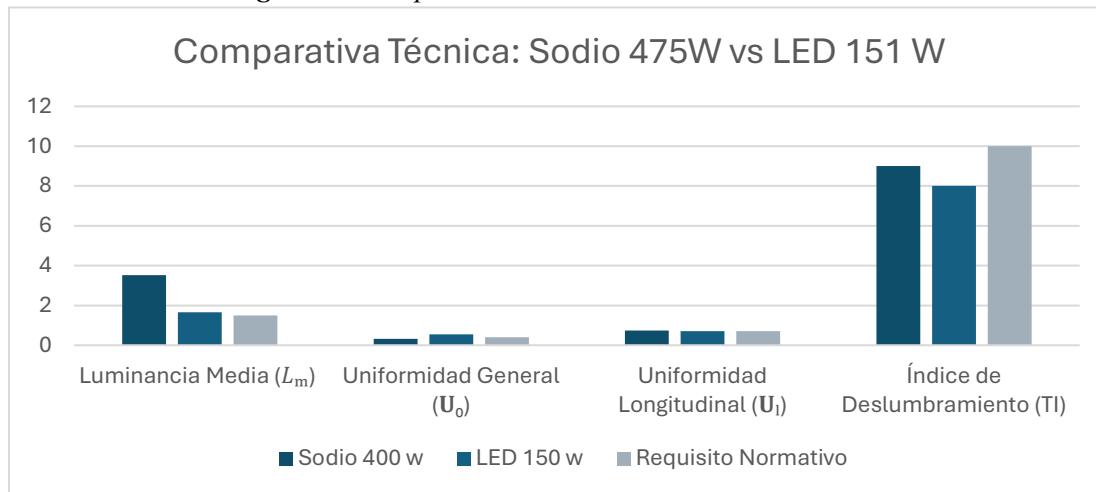
Dentro del análisis económico, se determinó que el proyecto resulta rentable ya que al considerar una vida útil para las luminarias led de 10 años, se obtiene un retorno de inversión de \$78,896.525 con una tasa interna de rentabilidad del 20.64% que supera la tasa de interés del descuento planteado. Se concluye que existe un flujo de retorno de inversión positivo a partir de 4 años y nueve meses, donde ya se generan ganancias y se recupera el dinero invertido por el costo de las luminarias cambiadas.

3.2.4 Inversión

En este estudio se evaluó la viabilidad económica de reemplazar 300 luminarias de sodio de alta presión por luminarias LED de mayor eficiencia energética. La luminaria de sodio en cuestión tiene un costo unitario de \$170, mientras que la luminaria LED seleccionada tiene un costo de \$298 por unidad. A pesar de que el costo inicial de la luminaria LED es superior, esta tecnología presenta ventajas significativas en términos de eficiencia, vida útil y ahorro energético.

Con base en estos valores, se estimó un valor neto actual (VAN) en 10 años donde se retorna un aproximado de \$78,896.74 con una tasa interna de retorno del 20.64%. Se recupera lo invertido a partir de 4 años con 9 meses de haberse realizado el cambio de luminarias. Estos cambios se suman a los resultados en las comparativas lumínicas, ya que bajo estos términos la diferencia no es tan notoria y el peso recae dentro del análisis energético-económico.

Imagen 3.1. Comparativa técnica entre luminarias



Fuente: Autor

3.3 Análisis de resultados

Considerando los resultados obtenidos con las mediciones de iluminancia tanto de manera experimental como simulados, se puede deducir que ambos sistemas de iluminación (lámparas de sodio y led) presentan niveles similares de proyección lumínica, siendo la luminaria led la que distribuye de mejor manera el alumbrado con un menor índice de deslumbramiento y zonas oscuras. Esto permite que el usuario final se sienta más seguro con un mejor servicio de alumbrado público y las vías ya no representen un peligro para el peatón o los vehículos. Esto se evidencia en las tablas 12 y 13.

Al comparar el consumo nominal y considerando los parámetros eléctricos de ambos tipos de luminaria según las mediciones tomadas en todo el año, es notorio que el sistema actual que consta de luminarias led consume menos energía, esto sumado a que los niveles de iluminancia son similares e incluso superiores a los de las lámparas de sodio que se tenían antes del cambio, se determina que el sistema reemplazado presenta mejor viabilidad en el aspecto energético, donde existe menor consumo de aproximadamente 464,517.653 kWh menos antes del cambio. Este valor se determinó asumiendo 12 horas de operación para ambos tipos de sistema bajo los parámetros eléctricos de operación medidos en cada caso. Al ser más viable, significa que el sistema led produce menores pérdidas y la empresa eléctrica distribuidora tendrá que pagar menor cantidad de dinero por consumo de energía total.

Con respecto a la viabilidad económica, al consumir menor cantidad de energía y mantener constante el precio de compra de energía por parte de Cnel para este tipo de circuitos lumínicos, el cambio a sistema led ahorra un estimado de \$21,795.17 anuales con solo 300 luminarias intervenida, obteniendo una tasa interna de retorno del 20.64% en un tiempo estimado de 10 años,

donde se recuperará el dinero invertido en apenas 4 años y 9 meses que es menos de la mitad del tiempo de vida útil de la luminaria led. A macro escala, el proyecto puede ser un valor modelo considerable si se desea extrapolar este tipo de proyectos a nivel de todo el sistema de alumbrado público en Guayaquil, ahorrando energía y dinero con proyectos similares gracias al bajo consumo de energía y características eléctricas-constructivas de las luminarias led en general.

Capítulo 4

4.1. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Tras aplicar las fases necesarias para la optimización luminotécnica y evaluación energética del alumbrado público en vías de Guayaquil con luminarias LED, se obtienen las siguientes conclusiones con respecto a la investigación y análisis realizado:

- La implementación de luminarias LED en el tramo piloto evaluado logró cumplir con la normativa ARCERNR-007/23, mejorando la uniformidad general y reduciendo el índice de deslumbramiento, lo que se traduce en una iluminación urbana más homogénea y visualmente cómoda para usuarios y vehículos.
- El reemplazo de luminarias de sodio de 475 W por LED de 151 W redujo el consumo energético anual en aproximadamente 464,517.653 kWh para el tramo analizado, generando un ahorro económico anual estimado en \$21,795.17, lo que confirma la eficiencia y rentabilidad del cambio.
- Se diseñó una plantilla técnica en Matlab que permite la sistematización y estandarización en la recopilación de datos antes, durante y después del cambio de luminarias, facilitando que este tipo de proyectos sea replicable en otros proyectos y circuitos de alumbrado público en Guayaquil, mejorando la evaluación de la intervención en el cambio de luminaria.
- Se consiguió determinar la viabilidad del cambio de luminaria, donde en conjunto con un diseño y plantilla de sistema optimizado en parámetros lumínicos, energéticos y económicos regidos por la normativa ARCERNR-007/23, evalúan como rentable al proyecto planteado garantizando un servicio de calidad para el usuario final.

4.1.2 Recomendaciones

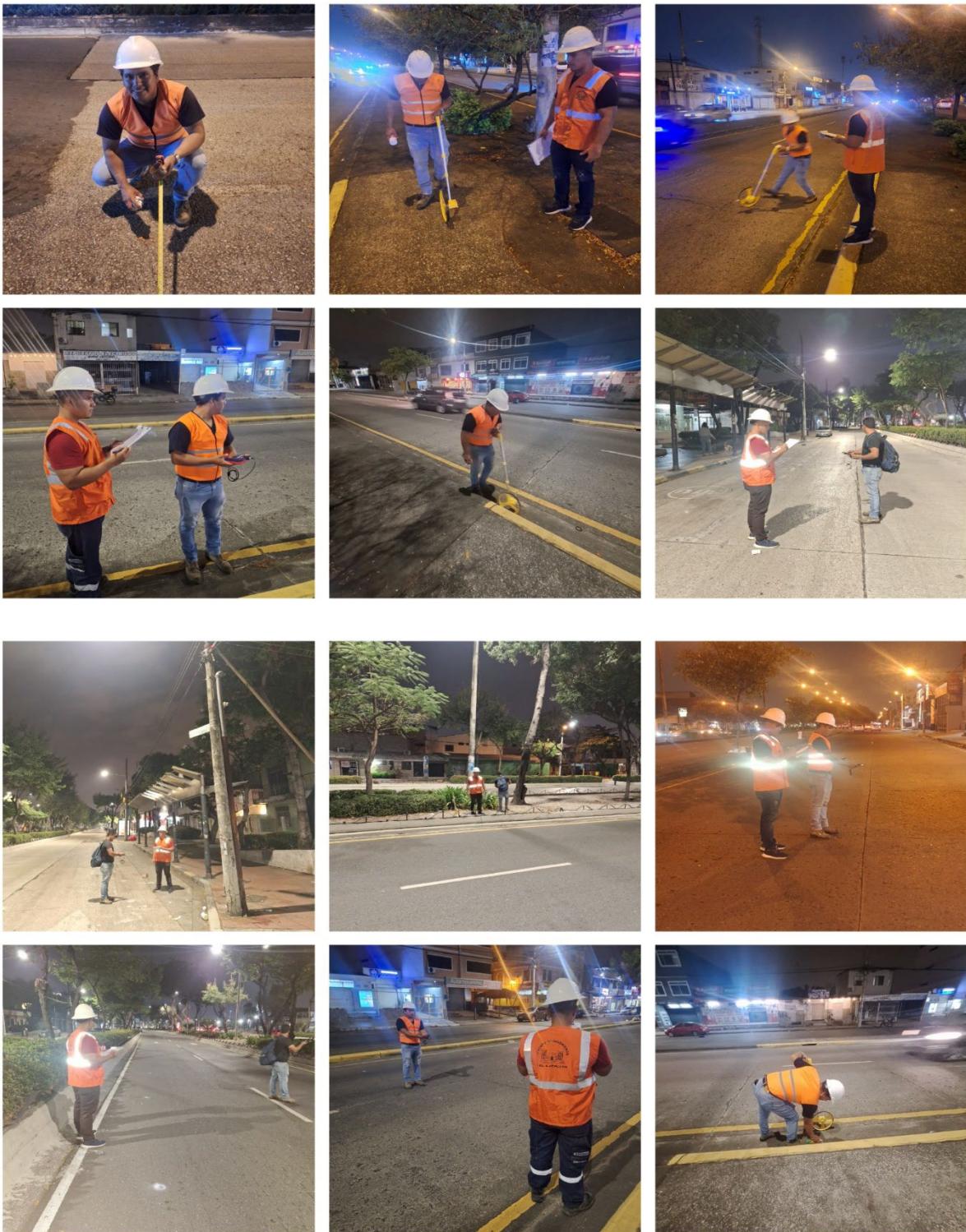
Al culminar el estudio planteado en esta propuesta, se sugieren las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y acciones:

- Se recomienda realizar un estudio macro que abarque más tramos representativos y diferentes clases de vías en Guayaquil, con el fin de validar y extrapolar los beneficios técnicos, económicos y energéticos encontrados en esta investigación piloto junto a mediciones simuladas y experimentales.
- Se sugiere investigar la integración de sistemas de control inteligentes (como sensores de presencia o regulación automática del flujo luminoso) para maximizar aún más el ahorro energético y la eficiencia del alumbrado público en Guayaquil.
- Se recomienda desarrollar procedimientos específicos para el mantenimiento preventivo y correctivo de luminarias LED, con enfoque en la gestión ágil y eficiente de fallas, para optimizar la relación empresa-usuario y la operatividad del sistema, así como estimar los costos por mantenimientos asociados a este tipo de sistema de iluminación.

Bibliografía

- [1] J.García. (2019, mayo 16). "Alumbrado de vías públicas," [Online]. Disponible en: https://recursos.citcea.upc.edu/llum/exterior/vias_p.html.
- [2] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, "Regulación Nro. ARCERNNR-007/23," ARCERNNR, Quito, Ecuador, 2023.
- [3] A.Lee.(2025, julio 10). "High pressure sodium lamps," [Online]. Disponible en: <https://pressbooks.bccampus.ca/basiclightingforelectricianslevel2/chapter/high-pressure-sodium/>.
- [4] H. A. Villarroel Almeida, «Análisis de los Beneficios Económicos y Sociales para la Implementación de Iluminación LED en el Alumbrado Público,» *Instituto Tecnológico Superior de Tecnologías Apropriadas INSTA*, vol. II, nº 1, pp. 5-7, 2019.
- [5] C. E. C. N. d. Eléctricidad, «Instructivo para el Mantenimiento del Sistema de Alumbrado Público,» Gestión Técnica/Alumbrado Público, Guayaquil, 2024.
- [6] LEDYI.(2022, diciembre 2). «Ventajas y desventajas de la iluminación LED,» [Online]. Disponible en: <https://www.ledyilighting.com/es/advantages-and-disadvantages-of-led-lighting/>.
- [7] ARCONEL.(2025, agosto 26) «Datos estadísticos de energía,» [Online]. Disponible en: <http://reportes.controlrecursosyenergia.gob.ec/Login.aspx?ReturnUrl=%2fHome%2fFrame.aspx>.

Apéndice



Mediciones de parámetros lumínicos registrados en la avenida Isidro Ayora



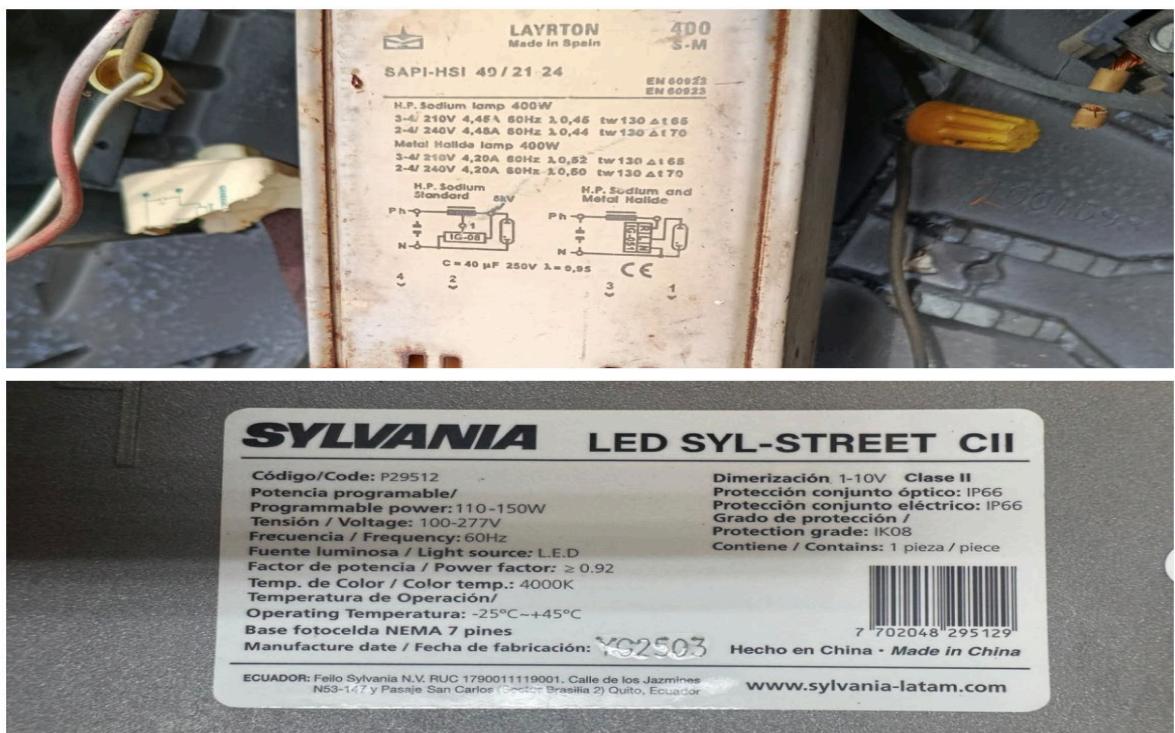
Mediciones de parámetros eléctricos de luminarias de sodio registrados en el taller de alumbrado público en Guayaquil



Mediciones de parámetros eléctricos de luminarias led registrados en el taller de Sylvania



Reemplazo de luminarias de sodio por luminarias led en Avenida Isidro Ayora



Parámetros nominales de luminarias de sodio (Layrton) y led (Sylvania)